

Hollow Cubes

Fritz Büsching

Übersicht

Durchströmbare Böschungsstrukturen sind im Jahre 1992 erstmals beim Bau eines Wellenbrechers an der Einfahrt zum Hafen Baltrum/Nordsee verwendet worden. Unter der Förderung des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, vertreten durch das Niedersächsische Hafenamt Norden befinden sie sich nunmehr im 10ten Jahr ihrer Erprobung und haben seitdem mehr als 40 Sturmtiden mit Wasserständen $\geq M_{Thw} + 1,5$ m schadlos überstanden. Bei dem betreffenden Testbauwerk wird auf Grund seiner besonderen Hohlstruktur die Wechselwirkung Welle – Bauwerk derart beeinflusst, dass deutlich geringere Wellenlasten auf das Bauwerk ausgeübt werden als bei einem herkömmlichen Bauwerk dieser Art (Abb. 1).

Modelluntersuchungen im Maßstab 1:5 hatten die folgenden Vorteile gegenüber

einer quasi glatten Böschungsstruktur ergeben:

- Die Energie der am Bauwerk brechenden Wellen ist bis zu rd. 40 % reduziert
- Die Energie der Waschbewegung (Wellenauflauf/Wellerücklauf) gebrochener Wellen ist bis zu rd. 50 % reduziert
- Da der Sturzbrecher hier nicht auftritt, tendiert die Wahrscheinlichkeit von Druckschlägen gegen Null
- Verstärkter wasserseitiger Lufteintrag begünstigt die biologischen Abbauprozesse in Ufernähe.

Durch den langjährigen Naturversuch wurde nicht nur die dauerhafte Stabilität des Bauwerks bestätigt, sondern zugleich auch dessen hydraulische Effektivität nachgewiesen, die sich u.a. darin manifestiert, dass – wie vorhergesagt [1] – eine Einsandung/Verlegung der Hohlstrukturen nicht eingetreten ist. Damit ist die Aussicht eröffnet, dass wellenbelastete Bö-

schungsbauwerke unter Verwendung von Hohlkörperstrukturen künftig nicht nur sicherer sondern auch massen- und raumsparender und damit insgesamt kostengünstiger ausgeführt werden können.

Unter den Aspekten des Umwelt- und Naturschutzes sind besonders hervorzuheben

- der deutlich höhere Sauerstoffeintrag an der Wasseroberfläche und
- das durch die Hohlkörper bereitgestellte Schutzraumangebot für Kleinlebewesen.

Da die Besonderheiten über Hohldeckwerke in der deutschen Fachliteratur bisher nur wenig bekannt geworden sind, werden nachfolgend das Wirkungsprinzip von Hohldeckwerken zusammengefasst dargestellt und einige Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen mitgeteilt.

Problemstellung, Veranlassung

Böschungsstrukturen, die hauptsächlich durch brechende Meereswellen belastet werden, zählen zu Recht zu den häufigsten Ufer- und Küstenschutzkonstruktionen, da im Vergleich zu Bauwerken mit vertikaler Wand bereits allein durch die Geometrie einer geneigten Wand die Wellenreflexion vermindert wird – dies umso mehr je flacher und rauer die Oberfläche gestaltet ist.

Der Grad der Reflexion ist aber ausschlaggebend für die sich am Bauwerk ausbildende Brecherhöhe, die ihrerseits alle wesentlichen Mechanismen des Bauwerksversagens bestimmt:

Die Brecherhöhe ist die entscheidende Größe bei Schäden infolge von quasihydrostatischen Druckspannungsunterschieden an den Außen- und Innenseiten von Deckschichten, bei Druckschlagphänomenen, infolge der Waschbewegung gebrochener Wellen (Wellenauflauf/Wellerücklauf), des Wellenüberlaufes etc. Zur dauerhaften Aufrechterhaltung der Schutzfunktion von Böschungsdeckwerken ist



Abb. 1: Durchströmbares Böschungsdeckwerk der Neigung 1: n = 1: 3, Flächengewicht 5 kN/m²; Baltrum 1992

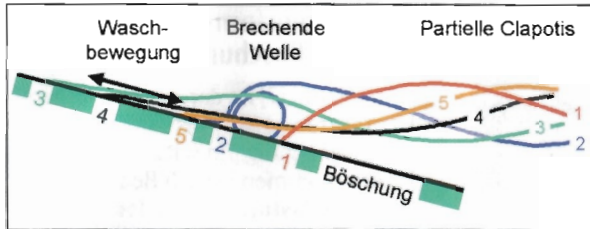


Abb. 2: Phasen 1, 2, 3, 4, 5, 1, 2, 3 ... des Wellenbrechens an einer ebenen Böschung

demnach deren Unterhaltung eine ständig zu erfüllende Aufgabe und die Anpassung der Bauwerke an veränderte Randbedingungen ist unerlässlich.

Konnte lange Zeit die Anpassung an angewachsene Schutzbedürfnisse darin bestehen, Bauwerke lediglich zu erhöhen und seeseitige Böschungen mit geringeren seeseitigen Neigungen auszustatten, ist ein derartiges Vorgehen heute oft in Frage gestellt.

Einerseits darf oft wegen mangelhafter Gründungsverhältnisse das Bauwerksge-
wicht nicht weiter erhöht werden und andererseits steht bei dem bereits erreichten Maß der Küstenbesiedelung der Raum für die Anordnung hinreichend flach geneigter Böschungen gar nicht mehr zur Verfügung.

Zwar sind derartige baugrundliche und geometrische Beschränkungen als Planungshindernisse bereits hinreichend gravierend. Heute muss aber die Begründung neuer Bauformen für hochbelastete Küstenschutzbauwerke darüber hinaus auch die weltweit vorhergesagten steigenden Wasserstände und die höhere Auftretenswahrscheinlichkeit von Sturmfluten als Lastgrößen einbeziehen.

Durch die Anordnung steilerer Böschungen können raum- und massensparende (leichtere) Lösungen aber nur dann realisiert werden, wenn zugleich auch wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der Reflexion und des Wellenauflaufes ergriffen werden können.

Aber auch bei bereits vorhandenen hinreichend standfesten Wasserbaustrukturen kann unter dem Gesichtspunkt der Kosteneinsparung eine örtlich begrenzte Nachrüstung zur Wellendämpfung nur in Betracht gezogen werden, wenn diese denn tatsächlich ihren Zweck erfüllt.

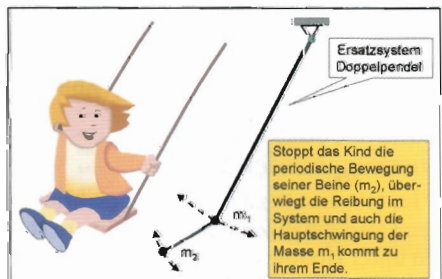


Abb. 3: Koppelschwingung mit zwei Freiheitsgraden

Physikalisches Phänomen und angestrebte Beeinflussung der Brandungskinematik

Im Hinblick auf die oben skizzierten Anforderungen an eine effektive wellenbelastete Böschungsstruktur hat der Verfasser 1989 [1],

[2] erstmals auf den Wechselwirkungsprozess zwischen der oberflächennahen Wasserteilchenkinematik partiell stehender Wellen und derjenigen der Waschbewegung (Wellenauflauf/Wellenrücklauf) vorausgegangener Wellen besonders hingewiesen (Abb. 2).

Demnach kann die Gesamtbewegung auch als diejenige eines Koppelschwingsystems mit einer Anzahl von Freiheitsgraden (in Analogie zur elastischen Kette) angesehen werden: Während seewärts der Brecherzone die Teilchenbewegungen überall im Strömungsfeld der partiellen Clapotis (bzw. derer Komponenten [9]) elliptisch verlaufen und somit örtlich jeweils als zwei senkrecht zueinander verlaufende Schwingbewegungen definiert werden können, dominiert landwärts der Brecherzone etwa nur der eine durch die

Böschungsneigung gegebene Freiheitsgrad der Waschbewegung. Dabei ist die Qualität der Kopplung – lose oder fest – im Bereich der Brecherzone durch die Art des Brechers bestimmt.

Bekanntlich sind Koppelschwingungen allgemein dadurch gekennzeichnet, dass eine vorgegebene Beeinflussung eines ihrer Freiheitsgrade immer Rückwirkungen auf die übrigen Freiheitsgrade des Gesamtsystems hat. Dies kann etwa an dem einfachen Beispiel einer Kinderschaukel demonstriert werden:

Nach Abb. 3 sei das auf der Schaukel sitzende Kind als Doppelpendel genähert.

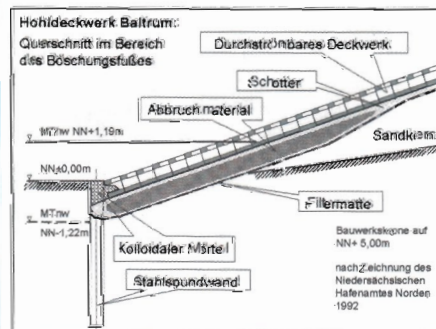


Abb. 4: Querschnitt durch eine durchström-
bare Böschungsabdeckung

Allgemein bekannt ist hier, dass das Kind die Hauptschwingung durch die Bewegung der Beine steuern kann.

Analog basiert beim Brandungsprozess der Vorschlag darauf, den Freiheitsgrad der Waschbewegung zu beeinflussen, um reduzierte Ausschläge bei den brechenden Wellen, d.h. kleinere Brecher, zu erzwingen. In diesem Sinne ist eine relativ weitgehende Modifizierung der Waschbewegung erforderlich, die über die An-



Abb. 5: Vergleichsuntersuchungen an Böschungen 1:n = 1:2

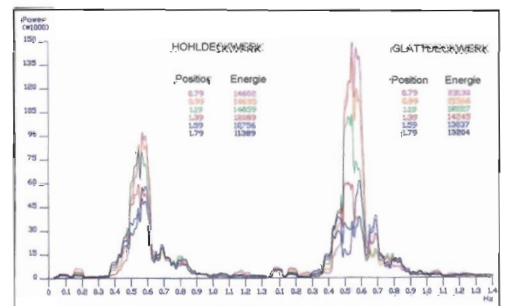


Abb. 6: Synchron an der durchström-
baren und der glatten Böschung gemessene Energiespektren der vertikalen Wasserspiegelauslenkungen

ordnung einfacher Rauheitselemente hinausgeht. Eine solche wird im vorliegenden Falle dadurch erreicht, dass zumindest ein Teil des Rücklaufwassers unterhalb der Böschungsoberfläche seewärts zurückgeleitet wird (Abb. 4). Insbesondere erlaubt das dann an der Leeseite der brechenden Welle fehlende Wasser (des Rücklaufes der vorangegangenen Welle) nur die Ausbildung einer entsprechend geringeren Brecherhöhe und eines veränderten Brechertyps.

Mit einer Vielzahl von Modelluntersuchungen im Labor für Hydromechanik und Wasserbau der FH Bielefeld [10] konnte gezeigt werden, dass tatsächlich über die Reduzierung der Brecherhöhe hinaus, die bekanntlich mit ihrem Quadratwert der Wellenenergie proportional ist, nicht nur auch der Wellenauflauf gemindert wird, sondern auch Brecherform und Bre-

cherposition (und damit die Art der Kopplung) im Sinne geringerer Bauwerksbelastungen günstig verändert werden: Je nach Böschungsneigung wird durch die durchströmbare Hohldeckwerksausführung in jedem Falle eine Veränderung des Brechertyps in der Art bewirkt, dass der Sturzbrecher, der bei Böschungen als einziger die gefürchteten Druckschläge erzeugen kann, hier nicht auftritt (Abb. 5).

Beispielhaft ist in Abb. 5 für eine in beiden parallel angeordneten Wellenkanälen gleich erzeugte Welle gezeigt, dass die Brechertransformation stark unterschiedlich erfolgt. Während an der quasi glatten Böschung (rechts) der durch einen Sturzbrecher erzeugte, bereits auf seinem Rückweg befindliche Auflaufschwall zu sehen ist, handelt es sich bei dem Vorgang an der durchströmbaren Böschung (links) um das aus den Hohlwürfeln seawärts austretende Wasser eines Reflexionsbrechers (collapse breaker).

Modelluntersuchungen

Fast alle seit 1990 ausgeführten Tests im Modellmaßstab 1:5 betrafen sogenannte »Hollow Cubes«, als

- ebene einlagige Böschungsabdeckung oder
- getrept gestufte Anordnungen in Stapelbauweise mit zwei Lagen.

Als Vergleichsböschung wurde jeweils für beide Ausführungsformen eine konventionelle quasi glatte Böschung (bestehend aus Betonpflaster oder -platten) synchron mit demselben (von der Wellenmaschine erzeugten) Steuerspektrum irregulärer Wellen beaufschlagt.

Zur vergleichenden Beurteilung der unterschiedlichen Reflexionswirkungen im

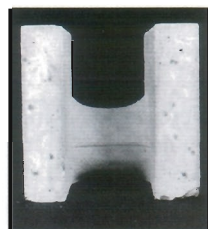


Abb. 7: Großformatiger Hohlformkörper



Abb. 8: Großformatige Hohlformkörper bilden in Stapelbauweise eine Böschungsneigung 1:n = 1:2

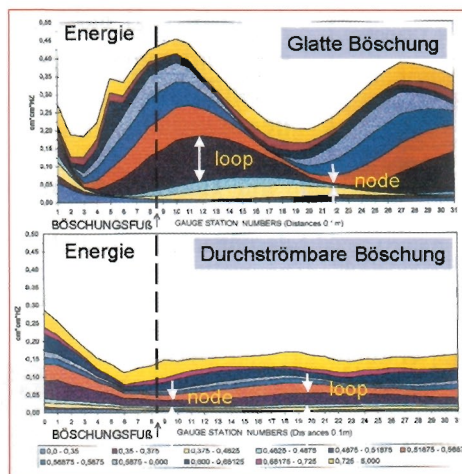


Abb. 9: Energie der vertikalen Teilchenbewegung im Wellenfeld links (über der Böschung) und rechts vom Böschungsfuß

bzw. Druckaufnehmer installiert. Deren zeitabhängige analoge Signale wurden zunächst der Fouriertransformation unterzogen, um u.a. für Aussagen bezüglich des Energiegehaltes definierter Frequenzbänder und zur Berechnungen frequenzabhängiger Reflexionskoeffizienten verwendet zu werden, vergl. [3], [9].

Die gemessenen bzw. berechneten Wellenspektren repräsentieren dabei an jeder Pegelposition die überlagerten vertikalen Wasserspiegelauslenkungen (Quadratwerte) der von See kommenden und der reflektierten Wellen (composite energy spectra) und die vom jeweiligen Spektrum eingeschlossene Fläche (integrated spectrum area IA) ist der resultierenden Wellenenergie proportional.

Abb. 6 enthält für den Bereich vom Böschungsfuß (Station 1,79 m) bis etwa in die Zone der maximalen Brecherinstabilität (Station 1,19 m – 0,79 m) jeweils sechs derartige übereinander dargestellte Spektren vor der durchströmbaren und vor der glatten Böschung.

Für die Brecherzone ist damit direkt belegt, dass hier die Energie an der durchströmbaren Böschung um etwa 37 % geringer ist als an der glatten Böschung. Eine Auswertung bezüglich des gesamten Frequenzbereiches lieferte nach [3], [4] einen um 50 % reduzierten Reflexionskoeffizienten CR.

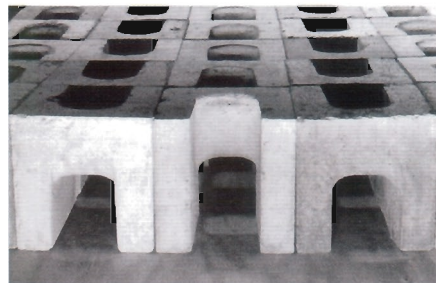


Abb. 10: Unten offene Hohlformkörper als einlagige Schutzschicht auf stabiler Unterkonstruktion

Ausführungsformen für 1:2 geneigte Böschungsbauwerke

In [6] und [7] ist dargelegt, dass Hohlstrukturen etwa bis zu einer Böschungsneigung 1:n = 1:2 effektiv sind. Hierfür kommen je nach Bedeutung der Wellenbelastung entweder noch die durchströmbaren ebenen einlagigen Böschungsstrukturen (Hollow Cubes) oder getrept gestufte Anordnungen in Stapelbauweise mit zwei Lagen in Betracht. Die letzteren dürften insbesondere für wellenbrecherartige Bauwerke in größerer Wassertiefe die effektivere Lösung darstellen. Nachfolgend werden Formkörper für beide Ausführungsformen jeweils basierend auf der Grundform von Betonhohlwürfeln vorgestellt sowie zugehörige Modellergebnisse mitgeteilt.

Großformatige Hohlwürfel mit einem Steg an einer Würfelkante

Der in Abb. 07 dargestellte Hohlformkörper ist vornehmlich für die Verwendung in Stapelbauweise etwa bei Wellenbrechern mit Einzelmassen von mehreren Tonnen vorgesehen. Mit der in Abb. 8 dargestellten regelmäßigen Stapelung sind dann die folgenden Vorteile verbunden:

- die Angriffsflächen für dynamische Liftkräfte oder etwaige Druckschlagkräfte sind minimal
- die Bewegungsfreiheit der Einzelblöcke ist stark eingeschränkt
- je höher die Porosität des Gesamtbauwerkes desto geringere Reflexionskoeffizienten sind erzielbar.

Aus dem Vergleich mit einer glatten Betonböschung ergibt sich nach Abb. 9, dass am Fuß des Hohlbauwerkes die Wellenenergie lediglich noch etwa 1/4 derjenigen vor einem glatten Bauwerk beträgt. Dementsprechend ergibt sich der Vergleich der Reflexionskoeffizienten für das gewählte Wellenspektrum wie folgt:

Glatte Deckwerk: $0,5 \leq CR \leq 0,85$

Hohldeckwerk: $0,1 \leq CR \leq 0,3$.

Einzelheiten zu den verwendeten Analyse- und Auswerttechniken, insbesondere auch bezüglich frequenzbezogener Ergebnisse, sind insbesondere in [9] zu finden. Derselbe Hohlformkörper kann auch in einlagiger ebener Anordnung (mit dem Steg an einer Oberkante) verwendet werden, falls ein hinreichend standfester Böschungsunterbau auf andere Weise erstellt werden kann bzw. vorhanden ist (Abb. 10).

Hollow Cubes als einlagige Böschungsabdeckung

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen großformatigen Hohlformkörpern sollen unter Hollow Cubes im engeren Sinne insbesondere solche Betonformkörper verstanden werden, die an ihrer Auflagerseite geschlossen ausgeführt sind (Abb. 11, 12).

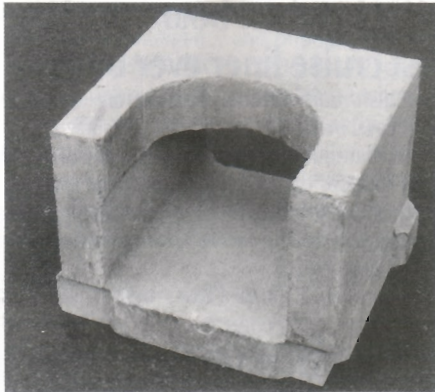


Abb. 11: Hollow Cube mit Verbundelementen an der Auflagerseite



Abb. 12: Hollow Cube ohne Verbundelemente

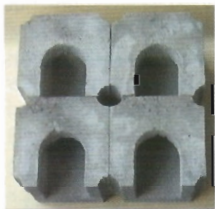


Abb. 13: Eckausbildung ermöglicht Druckwasserausgleich

In Abb. 11 ist der für das Testbauwerk Baltrum verwendete Hohlformkörper dargestellt. Dieser war im Sinne eines besseren Verbundes durch Ausnehmungen und korrespondierende Anformungen in der Lagerfläche gekennzeichnet. Da sich die Anformungen aber bei der Verlegung als hinderlich erwiesen haben, sollten solche

bei künftigen Bauvorhaben nicht mehr verwendet werden.

Bei geeigneter Formgebung sollte auf eine über die Reibkräfte in den Stoßfugen hinausgehende Verbundwirkung verzichtet werden können, um ggf. quasihydrostatische Druckwasserkraften aus dem Bauwerksinneren aufzunehmen.

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde der in Abb. 12 abgebildete dementsprechende Hohlformkörper verwendet. In Abb. 13 ist erkennbar, wie insbesondere durch eine geeignete Eckausbildung bei Hollow Cubes zugleich wichtige Nebenforderungen miterfüllt werden können.

Ausnehmungen an den vertikalen Kanten • können im Sinne einer wirtschaftlichen Verlegungsmethode als Fixierhilfen (für Hydraulikgreifer) zur gleichzeitigen Aufnahme mehrerer Elemente dienen und • bilden zugleich ausreichende Entlastungsöffnungen zum Abbau von Druckwasserkraften.

Etwa wie in Abb. 9 enthalten auch die Abb. 14 und 15 exemplarisch die Wellenenergie als Funktion der Böschungsentfernung, jedoch bezüglich eines dazu unterschiedlichen Steuerspektrums und in einer dreidimensionalen Darstellung.

Wegen des im Rahmen dieses Beitrages begrenzten Raumes ist es nicht möglich, alle durch die verwendete spektrale Untersuchungsmethode gelieferten Ergebnisse, insbesondere im Zusammenhang mit partiell stehenden Wellenkomponenten, umfassend zu interpretieren.

Es sei hier lediglich herausgestellt, dass sich die vorteilhafte Wirkung der einlagig verlegbaren Hollow Cubes im Vergleich zu derjenigen vorteilhaften Wirkung der großformatigen Hohlformkörper in Stapelbauweise auf unterschiedliche Frequenzbänder bezieht. In Übereinstimmung mit der Zuordnung der längeren Wellen zu größeren Wassertiefen können gerade hier für den langwelligen Bereich durch großvolumige Hohlformkörper noch relativ große Dämpfungswerte erzielt werden, während an küstennäheren, flacheren Standorten gerade kleinere Hollow Cubes zur Dämpfung des höher frequenten Spektralbereiches ($0,6 \leq f \leq 0,8$ Hz im Modell, vergl. Abb. 14 und 15) ausreichen.

Im Übrigen trifft für alle Hohlformkörpertypen die triviale Feststellung zu, dass eine umso größere Beeinflussung (Wellendämpfung) erzielt wird, je größer die Abmessungen der Hohlformkörper relativ zur Wellenlänge sind.

Schrifttum

- [1] Büsching, F.: Durchströmbare Böschungsstrukturen. BAUINGENIEUR Nr. 6, (1991) p. 11-14
- [2] Büsching, F.: Embankment Protection Structure; European Patent Office Nr. 91103801.6-2303, (1991) p.1-47
- [3] Büsching, F.: Wave and Downrush Interaction on Sloping Structures. Proc. 10th International Harbor Congress, Antwerpen, Belgium, (1992) p. 5.17-5.25
- [4] Büsching, F.: Imperfect Reflection from Permeable Revetment Structures. 1st Int. Scientific Colloquium CAE TECHNIQUES, Rzeszow, Poland, (1994) p. 177-189
- [5] Büsching, F.: Hollow Revetment Elements, COPEDEC IV, Rio de Janeiro, Brazil, (1995) p. 961-976
- [6] Büsching, F.: On the Change of Reflection from Different Sloping Structures, 2nd Int. Scientific Colloquium CAE TECHNIQUES, Bielefeld, Germany (1995) p. 305-314
- [7] Büsching, F.: Reflection from Hollow Armour Units, COPEDEC V, Cape Town, South Africa (1999) p. 1362-1370
- [8] Büsching, F.: Reflection Estimates Derived From Structural Response Spectra. 4th International Colloquium CAX TECHNIQUES, Bielefeld, (1999) p. 401-410
- [9] Büsching, F.: Dispersion and Reflection at Sloping Structures. Proc. PDCE'2000 Conference Varna, Bulgaria Vol.I, (2000) p. 29-38
- [10] Büsching, F.: Präsentation Hollow Cubes - Hohlwürfel -, (2001) CD 49 Folien

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching, Labor für Hydromechanik und Wasserbau, FH Bielefeld, Dießelhorststr. 1, 38116 Braunschweig, Tel. +49531251-2004, Fax -2008, email: owner@hollow-cubes.de

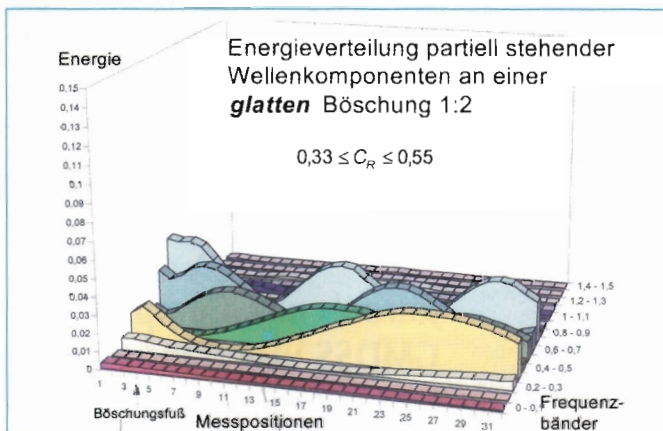


Abb. 14: Wellenenergie an einer quasi glatten Böschung 1:2 (Betonsteinpflasterung)

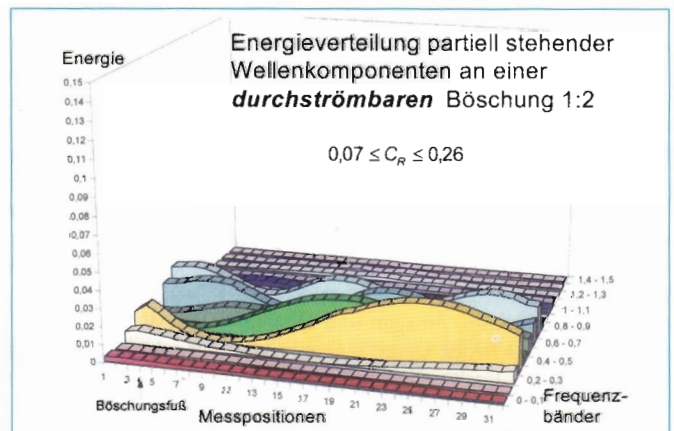


Abb. 15: Wellenenergie an einer durchströmbaren Böschung 1:2 (Hollow Cubes)